

образа жизни и повышению уровня здоровья населения в целом. Для получения полноценного продукта необходимо доработать интерфейс веб-приложения, провести финальное тестирование и разместить на облачной платформе либо сервере.

В дальнейшие планы входит внедрение сервиса как инструмента для тестирования студентов в процессе занятий физической культурой, что позволит также произвести отладку и проверить стабильность работы при большой нагрузке. Затем веб-сервис будет функционировать в режиме свободного доступа для всех желающих, что позволит проводить сбор и анализ данных пользователей, а также интегрировать данный веб-сервис в работу медицинских учреждений.

Список литературы

1. И. Шапошников Web-сервисы Microsoft .NET – БХВ-Петербург. – 2002. – С. 28-34.
2. Кубрик Я.Ю., Гостева П.В. Информатизация медицинских услуг как тренд: опыт российского BN -проекта, интегрированного с клиниками //Врач и информационные технологии. – 2016. – № 4.
3. Общие сведения ASP.NET Core MVC [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/ASPNET/Core/mvc/overview?view=aspnetcore-2.0>
4. EDM (модель данных с использованием сущностей) [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/data/adonet/entity-data-model>

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ПРИМЕРЕ ГТК-10-4

Пузанова А.В., Серков С.А.

Уральский федеральный университет г. Екатеринбург, Россия

nastya.puzanova.97@mail.ru, serkov.s.a@mail.ru

Аннотация. Целью данного расчетного исследования являлось изучение физики процесса течения и образования срывных зон рабочего тела в ОК при CFD-расчете. А также анализ влияния граничных условий, моделей

турбулентности и вращающейся корневой части в направляющем аппарате (НА) на структуру потока и согласование работы ступеней в ОК.

Ключевые слова: ГТК-10-4; k-ε; SST; осевой компрессор; численное моделирование; модель турбулентности; структура потока

NUMERICAL ANALYSIS OF THE GAS DYNAMICS OF AXIAL COMPRESSOR ON THE EXAMPLE OF GTK-10-4

Puzanova A., Serkov S.

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The purpose of this computational study was to study the physics of the process of flow and the formation of breakdown zones of a working fluid in an OC during CFD calculations. And also the analysis of the influence of boundary conditions, models of turbulence and the rotating root part in the directing apparatus (НА) on the flow structure and the coordination of the steps in the OK.

Key words: GTK-10-4; k-ε; SST; axial compressor; numerical modeling; model of turbulence; flow structure.

На сегодняшний день использование программ вычислительной газодинамики (CFD) при проектировании и доводке современных осевых компрессоров (ОК) позволяет значительно сократить время получения результата в отличие от эксперимента [1].

Но моделирование течения потока в лопаточном аппарате ОК включает в себя определенные сложности, связанные с расчетом турбулентных зон с неустойчивым характером течения, такими как отрыв потока с поверхности спинки пера лопатки и образование углового отрыва на торцевых поверхностях межлопаточного канала. И для того, чтобы наиболее точно моделировать эти течения необходимо установить, какие параметры расчетного кода дают минимальное отклонение результатов расчета от экспериментальных данных.

Для CFD-расчета, приближенного к реальному течению потока, необходимо воспроизвести все эффекты, происходящие в реальной ступени, исходя из этого, для наиболее корректного моделирования вторичных вихревых структур важно подобрать правильное сочетание настроек, как сеточной модели, так и моделей турбулентности [2].

Исследования выполнены на модернизированном 10-ступенчатом ОК ГТК-10-4, который был оптимизирован в результате экспериментальных и расчётных исследований существующего осевого компрессора ГТК-10-4.

На его примере были рассчитаны 4 варианта течения рабочего тела: на моделях турбулентности k-ε и SST при вращающемся и не вращающемся корневом обводе в НА.

Расчетная модель построена с отбором, который выполнен отдельным выходным доменом, по такому же принципу построен выходной диффузор, также с целью приближения данной модели к эксперименту задан вращающийся корневой обвод в направляющих венцах (5-10 ступени). Для расчета ОК в пределах данной задачи, количество ячеек для одного расчетного домена составила порядка 250 тыс. Используемый тип осреднения на границах расчетной области между вращающейся и неподвижной областью («Stage»), который выполняет интерполяцию между сопрягающимися расчетными сетками с учетом изменения системы координат и выполнения законов сохранения энергии.

На режимах работы ступени с устойчивой сходимостью расчета применялись следующие граничные условия: полное давление и полная температура на входе в ступень, статическое давления на выходе, а также отбор, за четвертой ступенью принимаемый как 2% от всего расхода воздуха, поступающего в ОК.

Как упоминалось ранее, создание физически правильной расчетной модели ОК, в данном исследовании основано на использовании вращающейся корневой части НА, что должно привести к более достоверным результатам.

При анализе интегральных параметров, полученных в результате расчетов с одинаковыми граничными условиями, установлено, что на модели турбулентности SST разница между вращающимся и не вращающимся корневым обводом в расходе и Δp_k составляет 0,13%.

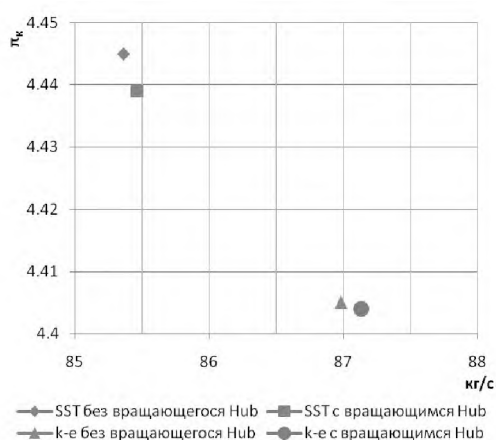


Рисунок 1 – Расходно-напорные характеристики рассчитанных точек

На модели k-ε $\Delta G_{np}=0,17\%$, $\Delta p_k=0,02\%$. Точки, рассчитанные с использованием вращающейся втулки в направляющих лопатках 5-10 ступени,

находятся ниже по изодроме. Причины, повлиявшие на данные погрешности, рассмотрены далее.

Использование модели турбулентности k-ε не дает достаточной точности при моделировании течений с отрывом, а также не учитывает такие локальные эффекты, как вторичные течения, вызванные анизотропией турбулентности в каналах, кроме этого нет видимого влияния на поток при применении вращающегося корневого обвода. Известно, что модель турбулентности SST более чувствительна к отрыву от гладких поверхностей в пограничном слое. Причем, если верхняя часть корневой полки у НА не вращается, то в корне образуются вихревые структуры. Но данная постановка задачи физически не верна, так как в реальности корень у НА вращается. При правильной постановке задачи, то есть при задании вращения корневой поверхности в НА, вихрь из радиального зазора размывается, при этом у обандаженных НА вихрь становится больше на 3,5 % (Рисунок 2).

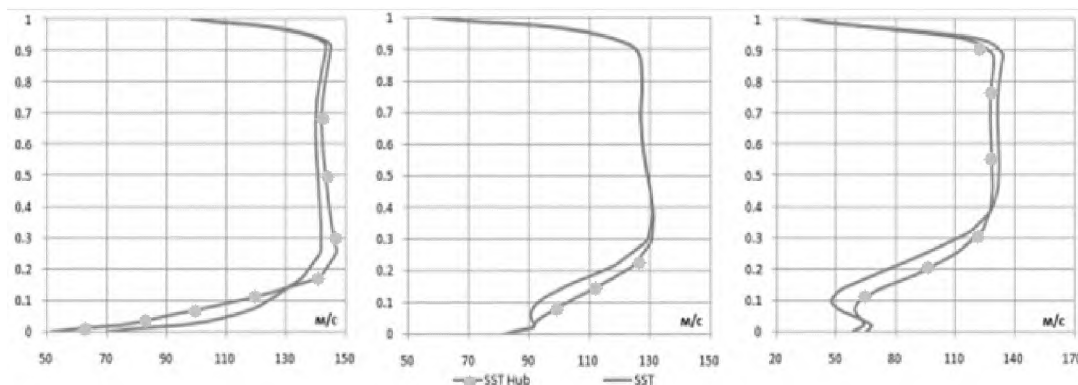


Рисунок 2 – Распределение осевой составляющей абсолютной скорости по высоте за НА: А – 2-ой; Б – 5-ой; 9-ой ступенями на модели турбулентности SST (Hub – вращение)

Вращение втулки в домене НА ускоряет поток в корне, в результате чего происходит размытие вихря в корневой зоне (ядро потока увеличивается в размерах, что связано с интенсивностью турбулентности в корне).

Данный показатель - интенсивность турбулентности, являющийся мерой пульсаций в данной точке потока, рассчитывается по формуле (2).

$$T_i = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} E_{\text{кин. потока}}}}{C_{\text{ср массов}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Вблизи поверхности интенсивность турбулентного перемешивания увеличивается, достигая 25% у корня, а в ядре потока составляет порядка 2-3%. Существенное отличие в турбулизации вихря за 2-ым НА, разница составляет около 10%, что связано с углом атаки, а также закрученным следом за

предыдущей решеткой. Вследствие этого зона перехода пограничного слоя в поток средней части межлопаточного канала увеличилась.

Установлено, что степень загромождения канала, то есть отношение площадей проходного сечения канала при вращающемся корневом обводе к не вращающемуся в среднем составляет 0,88. Это так же подтверждает то, что при задании вращающейся втулки вихрь размывается и пропускная способность (ядро потока) проточной части ОК увеличивается. Это является одной из причин того, что увеличение расхода влечет за собой снижение η_k , так как точка становится ниже по изодроме. По уравнению Эйлера (3) напор возрастает вместе с расходной составляющей C_a и, то есть с углом поворота в решетке РК.

$$H_{cm} = UC_a (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) \quad (3)$$

В первых ступенях ОК пристенный слой на ограничивающих поверхностях занимает незначительную часть площади канала, однако, по мере продвижения по ступеням, возникает существенное искажение полей полного давления и скорости и уровень неравномерности входного поля полного давления может достигать более 12-17% по длине лопатки.

На модели турбулентности $k-\epsilon$ наблюдается более равномерное распределение работы по ступеням. В первой и в последних ступенях работа заметно снижена по сравнению с работой, приходящейся на каждую из средних ступеней, что приводит к повышенным запасам по углам атаки в первых ступенях.

Выводы и рекомендации по стационарному моделированию течения потока

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при использовании модели турбулентности $k-\epsilon$ перетечки через радиальный зазор моделируются не точно, а задание вращающегося Hub не вносит заметных изменений в расчет. Модель турбулентности SST моделирует перетечки вихревых структур при не вращающемся Hub, но эта расчетная модель неверна. При правильном задании, то есть добавлении вращающегося Hub вихрь размывается и картина становится физически не правильной. Интенсивность турбулентности в ядре потока составляет порядка 2-3% так как там нет перемешивания вихревых структур, а в зоне радиального зазора, с не вращающимся Hub, турбулизация активная, поток перемешивается с потоком из радиального зазора. Следовательно, для того, чтобы учитывать вихрь нужно искусственно вводить дополнительную

турбулизацию потока в каждом домене, а не только на входе как это делает ANSYS.

Это находит свое подтверждение в статье John D Denton [3], где говорится о том, что в расчетной модели КС при интенсивности турбулентности 2% нет перемешивания в середине потока, а при введении дополнительной турбулизации 6% оно есть, что соответствует действительности.

Данные вариации могут возникнуть при продувке компрессора (любой лопаточной машины), их стоит принимать во внимание, так как они показывают варианты течения потока, нужно учиться задавать такую расчетную модель, которая будет давать результаты максимально близкие к экспериментальным.

Список литературы:

1. Инженерно-технический журнал «ANSYS Advantage. Русская редакция» издается с октября 2005 г. компанией ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» и является официальным печатным изданием компании ANSYS, Inc. [Электронный ресурс]
2. Пугачев П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX : учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. -120 с.
3. SOME LIMITATIONS OF TURBOMACHINERY CFD, John D Denton, Whittle Laboratory Cambridge, UK /Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air June 14-18, 2010, Glasgow, UK.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛЬФРАМА В РАСПЛАВАХ ХЛОРИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Рыжов А.А., Иванов А. Б., Волкович В. А.

Уральский федеральный университет г. Екатеринбург, Россия

a.a.ryzhov@urfu.ru

Аннотация. Методами высокотемпературной электрохимии и спектроскопии исследовано анодное растворение металлического вольфрама в расплавах эвтектических смесей $3\text{LiCl}-2\text{KCl}$ (723–1023 К) и $\text{NaCl}-2\text{CsCl}$ (823–